

ロボット車両のための移動障害物認識手法の開発

Development of Moving Object Detection and Tracking for Robot Cars

香 月 良 夫	技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 博士（工学）
坂 野 肇	技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 主査
金 島 義 治	技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 課長
曾根原 光 治	技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 部長
菅 沼 直 樹	金沢大学 准教授 博士（工学）

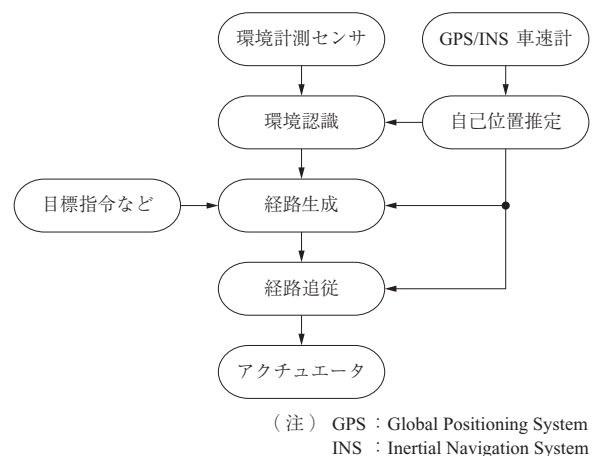
災害現場や物流現場などで無人で作業を行うロボット車両は、障害物などの状態を正確に認識する必要がある。そこで筆者らは、車両上に搭載したセンサによって、障害物を認識する技術の開発を進めている。他車両など（移動障害物）を静止しているものと区別して認識できないと、たとえば前方を横切る移動障害物に対して、接触を回避しようとその移動方向に進んでしまう可能性がある。本稿では、見え方の変化に対応しながら遠方から近場まで継続的に移動障害物を認識し、その未来位置を予測する手法を提案する。

For autonomous driving, it is important to detect obstacles. Therefore, the IHI group has developed obstacle detection with LIDAR (Light Detection and Ranging) mounted on a robot car. If a robot car cannot detect and track dynamic objects such as cars distinctly from static objects such as walls, it may collide with dynamic objects which cut across in front of it. However, it is difficult to detect and track dynamic objects because their appearance as viewed from the robot car changes. This paper explains dynamic object detection and tracking that can be applied to such cases. The effectiveness of the proposed method has been confirmed by an off-line evaluation.

1. 緒 言

2004～2007年に開催された DARPA Ground/Urban Challenge などの長距離無人車競技会によって、ロボット車両の実現可能性が大きく示された。現在、車両をロボット化する技術は自動運転自動車や運搬車両・建設機械の無人化・遠隔化・自動化など、さまざまな分野で研究・開発・実証・実用化が進められている^{(1)～(3)}。IHI グループではこれまで、災害現場など人が近づけない危険な場所で人の代わりに無人（遠隔操縦や自律制御）で調査や作業を行うロボット車両の研究を進めてきた⁽⁴⁾。またこれらの技術成果を活用し、各種応用分野での実用化に向けた開発も進めている^{(5)～(7)}。また近年では物流現場での労働力や熟練オペレータの減少に伴い、搬送を無人化・自動化するためのロボット車両の開発も進めている⁽⁸⁾。

自律走行するロボット車両は一般的に、地図上で目標位置や中間通過位置などを設定すると、設定位置までの経路を生成して同経路に沿って途中の「走行に影響を与える障害物」に対応（回避や減速・停止など）しながら走行する。一般的な自律走行ロボット車両の機能構成を第1図に示す。IHI グループでは災害現場などを対象として自



第1図 自律走行ロボット車両の機能構成
Fig. 1 Functional configuration of autonomous robot car

律走行するロボット車両の開発を進めており、ロボット車両が走行する路面には舗装路だけではなく未舗装路なども含む。そのため、認識すべき走行に影響を与える障害物としては縁石、ガードレール、分離帯など、比較的明確な人工物のほかにも、未舗装路の路端、路上にある落下・倒壊・放置物、車両や人、路面の一部である凹凸、^{わだち}轍、亀裂、段差などが考えられ、これらの位置・姿勢や形状を正確に認識することが必要となる。また、移動する車両や人

などに関しては位置・姿勢や形状だけでなく、移動方向や速度などの運動状態も合わせて認識する必要がある。

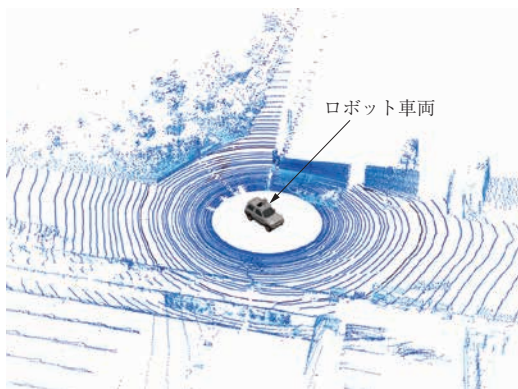
本稿では、このなかでも、他車両などの移動する障害物（以下、移動障害物）と建築物などの静止している障害物（以下、静止障害物）を区別して認識する技術の開発について報告する。

2. 環境地図生成と移動障害物認識の必要性

筆者らは、ロボット車両のための環境計測センサとして TOF (Time of Flight) 方式の LIDAR (Light Detection and Ranging) を使用し、同センサを車両上に搭載することで車両周囲の環境を計測している。第 2 図にロボット車両を示す。TOF 方式の LIDAR は、レーザ発光後の反射光を受光するまでの時間を計測することで対象までの距離を高精度に計測するセンサである。採用センサでは、レーザ発信源とレーザ受信部を複数もち、それらを回転して走査することで、車両周囲の広範囲を三次元で距離計測を行っている。第 3 図に LIDAR による 1 回の計測例を示す。



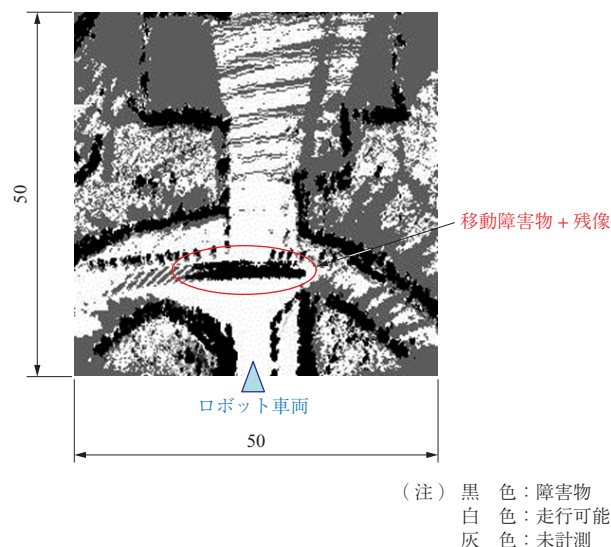
第 2 図 ロボット車両
Fig. 2 Appearance of robot car with LIDAR



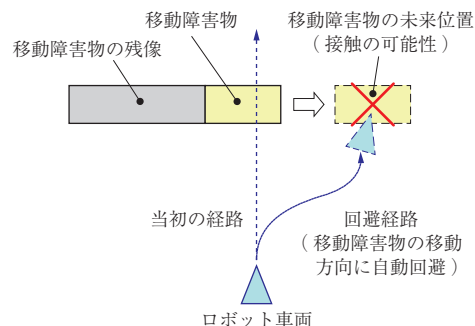
第 3 図 LIDAR による 1 回の計測例
Fig. 3 Example of measurement with LIDAR

青で示される部分は距離を計測できた領域を、白で示される部分は未計測の領域を示しているが、1 回の計測では必ず計測されない部分があり、高精度の距離計測ができる反面、カメラのように面での計測ができない欠点をもつ。このため路上に障害物があってもレーザが当たらず計測できない可能性もある。そこで筆者らは、確実に障害物を認識するために、走りながら複数回の計測・認識結果を蓄積・統合し、その結果を障害物、走行可能な領域、未計測領域などに整理した環境地図を生成し、環境地図からロボットが走行する経路の生成を行っている。

しかし同方法では、周囲に移動障害物が存在すると、移動障害物が、移動量に応じて広がった残像と合わせて障害物として登録されることになる。第 4 図に環境地図上の移動障害物と残像、第 5 図に前方を横切るような移動障害物の回避を示す。ロボット車両の前方を横切るような移動障害物がある場合に、未来位置が分からないため、障害物がない方向に回避しようとして、移動障害物の移動方向



第 4 図 環境地図上の移動障害物と残像（単位：m）
Fig. 4 Moving object and afterimage (unit : m)



第 5 図 前方を横切るような移動障害物の回避
Fig. 5 Avoiding collision with moving object that cuts across in front of robot car

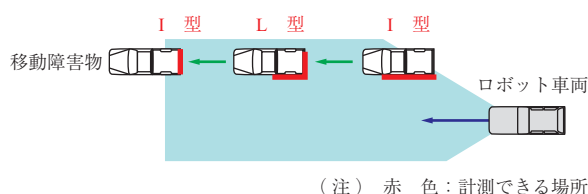
に経路を生成してしまい、その結果、移動障害物と接触してしまう可能性がある。

そこで移動障害物を回避して走行するためには、移動障害物と静止障害物を区別して認識するとともに、移動障害物に対してはその未来位置を予測することが必要になる。

3. 移動障害物認識手法

第 6 図に移動障害物の見え方の変化を示す。赤色で示すように、移動障害物の見え方は相対位置の変化によって、ロボット車両から直交する 2 辺が見える L 型と 1 辺のみが見える I 型に大きく変化する。このため、同じ移動障害物として継続的に認識することは難しい。これに対し、見え方の変化に対応した移動障害物認識手法がいくつか提案されている。

Petrovskaya らは現在の環境地図と過去に取得した環境地図を比較し、大きな変化が現れた領域を移動障害物として認識する手法を提案している⁽⁹⁾。しかし、災害現場や物流現場などでは、瓦礫などが散乱したり、荷物が搬入・搬出されたりと、状況の変化によって環境地図も大きく変化する。このため、このような移動障害物以外の状況の変化も移動障害物として誤認識し、その未来位置に対して不必要な回避や減速・停止をする場合がある。これに対し、



第 6 図 移動障害物の見え方の変化
Fig. 6 Changes in appearance of moving object

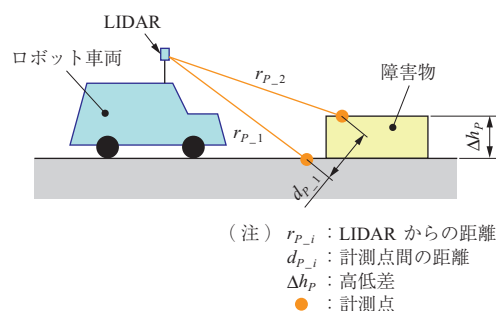
過去の環境地図を生成せず、移動障害物を L 型の 2 辺または I 型の 1 辺から構成される長方形として認識する手法が Darms らによって提案されている⁽¹⁰⁾。しかし、この手法では、移動障害物の辺の長さを正しく推定しにくい遠方では、長方形の形状が大きく変化するため、移動障害物を認識できない場合がある。

そこで本稿では、長方形ではなく L 型の 2 辺または I 型の 1 辺のまま扱うことで、見え方の変化に対応しながら遠方から近場まで継続的に移動障害物を認識し、その位置・姿勢や形状、運動状態（移動方向や速度）の情報を推定して未来位置を予測する手法を提案する。

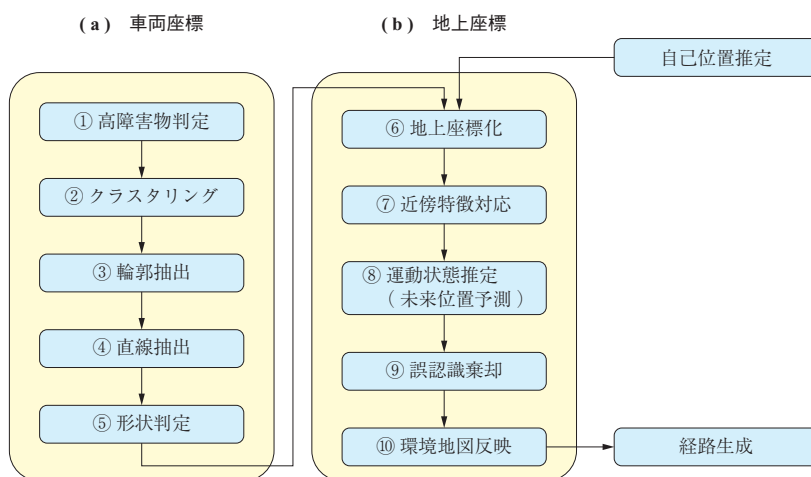
移動障害物認識手法の処理の流れを第 7 図に、各処理の機能を以降に示す。

3.1 高障害物判定

第 8 図に高障害物判定およびクラスタリングを示す。LIDAR の計測点間の高低差などから認識した障害物が第 8 図において (1) 式を満たす場合に、安定して認識できる高さをもつ高障害物と判定する。 Δh_p は高低差、 $\Delta h_{p_{th}}$ はしきい値であり、以降では添え字で th が付く変数はし



第 8 図 高障害物判定およびクラスタリング
Fig. 8 Tall obstacle determination and clustering



第 7 図 移動障害物認識手法の処理の流れ
Fig. 7 Algorithm for moving object detection and tracking

きい値を, avg が付く変数は平均を示す.

$$\Delta h_p \geq \Delta h_{p_th} \dots\dots\dots (1)$$

3.2 クラスタリング

第 8 図において (2), (3) 式を満たす場合に同じ塊 (クラスタ) とする.

$$d_{p_1} \leq d_{p_th} \dots\dots\dots (2)$$

$$|r_{p_1} - r_{p_2}| \leq r_{p_th} \dots\dots\dots (3)$$

3.3 輪郭抽出

LIDAR からの水平方向が同じ計測点のうち, r_{p_i} が最小のものをクラスタの輪郭として抽出する.

3.4 直線抽出

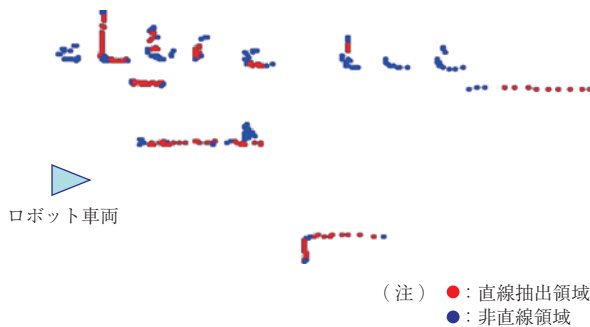
第 9 図に直線抽出を示す. 赤色の点の連続のように, クラスタの輪郭形状から直線領域を抽出する.

3.5 形状判定

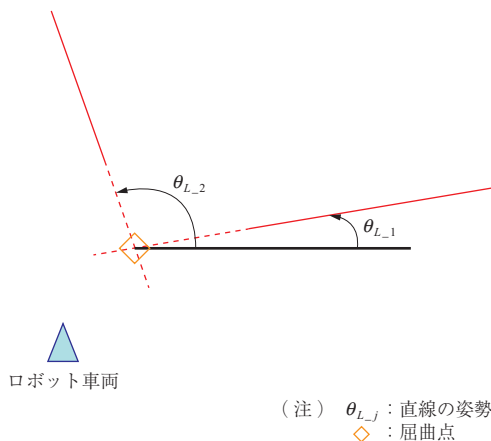
まず, 第 10 図に示す形状判定 (L 型) において (4) 式を満たす場合に, L 型のクラスタと判定し, 2 直線の交点を屈曲点とする.

$$\pi/2 - \theta_{L_th} \leq |\theta_{L_2} - \theta_{L_1}| \leq \pi/2 + \theta_{L_th} \dots\dots (4)$$

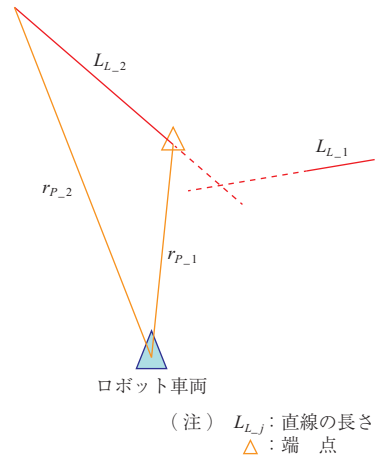
次に, L 型ではなく第 11 図に示す形状判定 (I 型) において (5) 式または (6) 式を満たす場合に, I 型のクラ



第 9 図 直線抽出
Fig. 9 Straight line extraction



第 10 図 形状判定 (L 型)
Fig. 10 Shape determination (L-type)



第 11 図 形状判定 (I 型)
Fig. 11 Shape determination (I-type)

スタと判定し, r_{p_i} が小さい方を端点とする.

$$L_{L_1} < L_{L_th1} \leq L_{L_2} \dots\dots\dots (5)$$

$$L_{L_2} - L_{L_1} \geq L_{L_th2} \dots\dots\dots (6)$$

ロボット車両からの相対位置の変化によって, クラスタが L 型であるか I 型であるか変化する.

3.6 地上座標化

ロボット車両の位置・姿勢を基準とする車両座標系で処理していたデータを, 自己位置推定結果のロボット車両の水平位置とロール角およびピッチ角, ヨー角を使用し, 地上座標系 (たとえばロボット車両の起動時の位置と北向きを基準とする座標系) に変換し, 過去の複数回の計測結果の蓄積を可能にする.

3.7 近傍特徴対応

3.7.1 クラスタの現在位置・姿勢の予測

前回の計測時の L 型または I 型のクラスタについて, 前回初めて計測された場合はその位置・姿勢を, 2 回以上計測されていて移動障害物候補または移動障害物でない場合は等速・等加速度運動モデルを使用して予測した位置・姿勢を使用する. 移動障害物候補または移動障害物である場合は後述する 3.8 節で予測した位置・姿勢を現在の位置・姿勢として使用する.

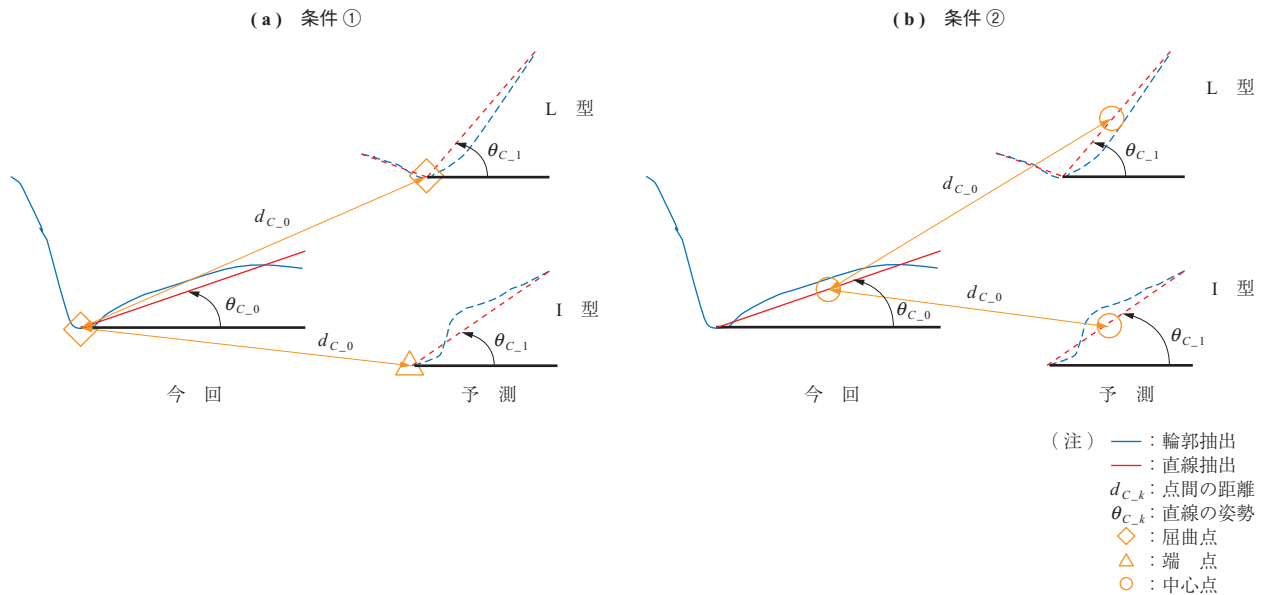
3.7.2 対応付け

3.7.1 項で予測した位置・姿勢と今回の計測時の L 型または I 型のクラスタの位置・姿勢が, 第 12 図に示す対応付けの条件① (- (a)) または② (- (b)) において (7), (8) 式を満たす場合に同じ物体として対応付ける.

$$d_{C_0} \leq d_{C_th} \dots\dots\dots (7)$$

$$|\theta_{C_0} - \theta_{C_1}| \leq \theta_{C_th1} \dots\dots\dots (8)$$

これによって, 長方形ではなく L 型の 2 辺または I 型



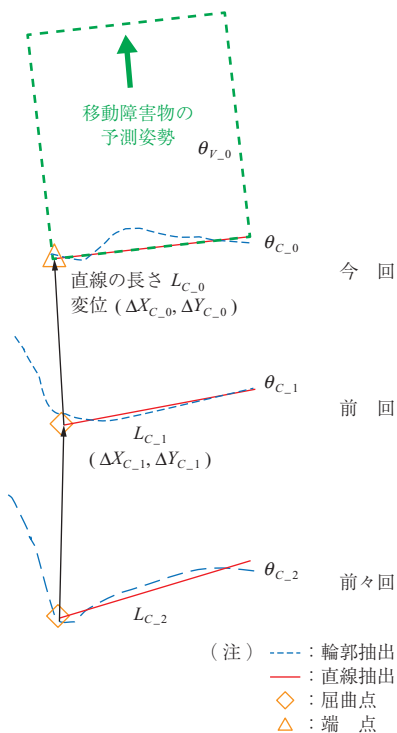
第 12 図 対応付け
Fig. 12 Association

の 1 辺のまま対応付けることが可能である。

複数のクラスタが該当する場合は、距離 d_{C-0} が最も小さいクラスタ同士を対応付ける。

3.7.3 移動障害物候補の判定

対応付けられた物体が、第 13 図に示す移動障害物の候補および移動障害物の判定において、(9)～(13) 式をすべて満たした場合に移動障害物候補であると判定する。



第 13 図 移動障害物の候補および判定
Fig. 13 Determination of moving object candidates and moving objects

P_{C-th} は移動量のしきい値を示す。(12) 式の V_{C-k} は (11) 式に示す。

$$\left| \sum_{k=0}^N \Delta X_{C-k}, \sum_{k=0}^N \Delta Y_{C-k} \right| \geq P_{C-th} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$L_{C-max} - L_{C-min} \leq L_{C-th} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$V_{C-k} = \sqrt{(\Delta X_{C-k} / \Delta T_{C-k})^2 + (\Delta Y_{C-k} / \Delta T_{C-k})^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (V_{C-k} - V_{C-avg})^2} \leq V_{C-th1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$|\tan^{-1}(\Delta Y_{C-0} / \Delta X_{C-0}) - \theta_{V-0}| \leq \theta_{C-th2} \quad \dots\dots (13)$$

ΔT_{C-k} は計測間隔である。(9) 式は物体が移動していることを、(10)、(12) 式は短時間で直線の長さおよび速度が大きく変化しないことを、(13) 式は移動方向が車両形状の長手方向と一致することを示している。ただし、L 型のクラスタの直線の長さは、ロボット車両からの相対位置の変化によって大きく変化するため、(10) 式は I 型のクラスタの場合のみに適用する。

3.7.4 移動障害物の判定

移動障害物候補と判定された物体が、短時間で速度が大きく変化しないことを確認する。第 13 図において (14) 式を M 回満たした場合に、移動障害物であると判定する。

$$V_{C-0} - V_{C-avg} \leq V_{C-th2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

対向車両の場合は、先行車両の場合よりも相対速度が高く早めに回避する経路を生成する必要があるため、移動障

害物候補の段階から移動障害物と同様に扱う。

3.8 運動状態推定（未来位置予測）

移動障害物との接触を回避するにはできるだけ長時間の未来位置を予測する必要がある一方、今回は移動障害物やインフラ側から情報を得られない条件で接触を回避することを前提としている。このため、移動障害物のデータを複数の時刻にわたり蓄積し、等加速度・等角速度運動モデルで拡張カルマンフィルタによって運動状態を推定することで、接触回避に最低限必要な短時間の未来位置を得ることとした。

ロボット車両が回避するためには、移動障害物の平面運動が分かれば十分なため、平面運動に限定している。状態量を (15) 式に、線形近似した状態方程式を (16) 式に、観測式を (17) 式に示す。

$$\mathbf{X} = (X \ Y \ \theta \ V \ W \ A)^T \dots\dots\dots (15)$$

$$\mathbf{X}(T + \Delta T) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cos \theta \Delta T & 0 & \frac{1}{2} \cos \theta \Delta T^2 \\ 0 & 1 & 0 & \sin \theta \Delta T & 0 & \frac{1}{2} \sin \theta \Delta T^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{X} \dots\dots\dots (16)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{X} \dots\dots\dots (17)$$

ただし、時刻 T 、予測期間 ΔT 、位置 (X, Y) 、姿勢 θ 、速度 V 、角速度 W 、加速度 A である。

運動状態推定には、3.7.2 項で対応付けに使用した点の位置と直線の姿勢を使用する。第 14 図に対応付けに使用する点の変化を示す。図に示すように、継続した対応付けの途中でその点が変わった場合は、(18) 式に示す変化量 $(\Delta X'_{i-1}, \Delta Y'_{i-1})$ を補正する。

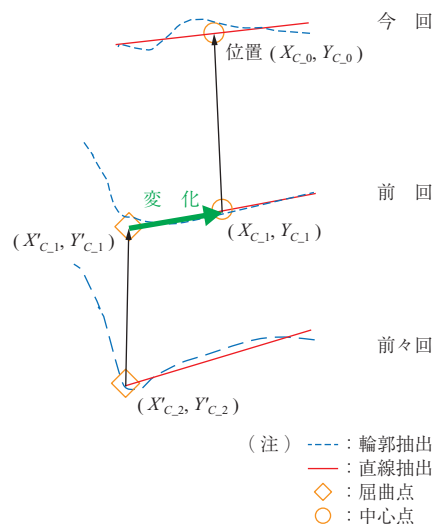
$$(\Delta X'_{C-k}, \Delta Y'_{C-k}) = (X_{C-k} - X_{C-k-1}, Y_{C-k} - Y_{C-k-1}) \dots\dots\dots (18)$$

本推定結果を用いて、次の計測時と設定した時間後の移動障害物の位置・姿勢を予測する。

3.9 誤認識棄却

3.8 節における運動状態の推定誤差 d_{E_0} が (19) 式を満たす場合は、誤認識として棄却する。

$$d_{E_0} \geq d_{E_th} \dots\dots\dots (19)$$



第 14 図 対応付けに使用する点の変化
Fig. 14 Change of point used for association

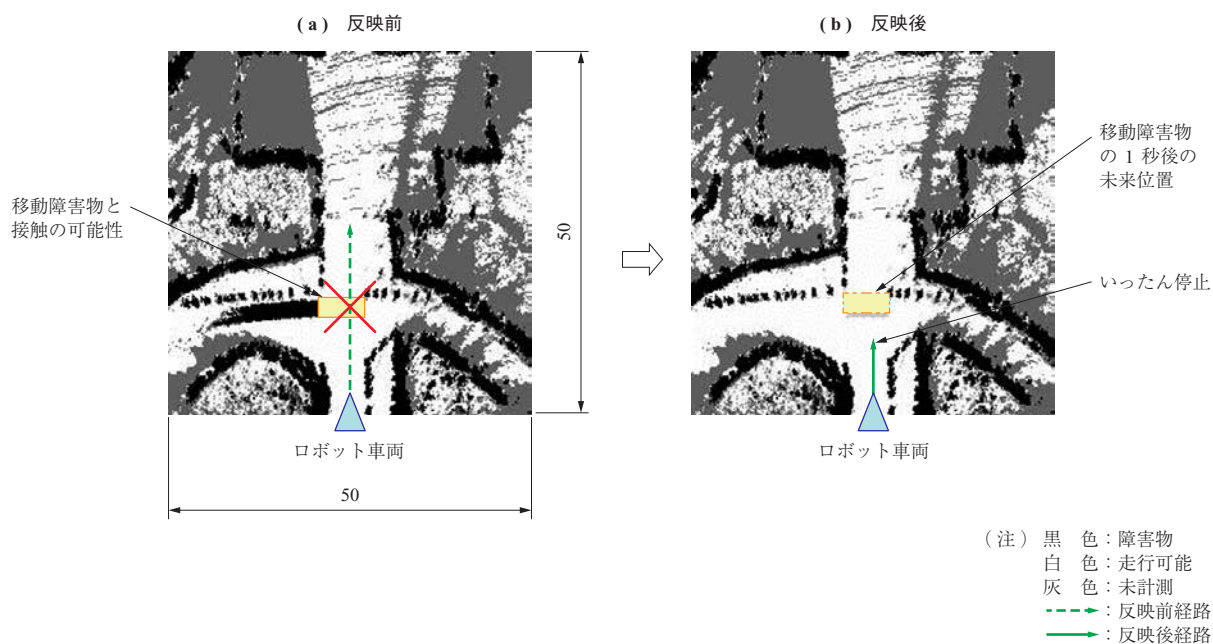
3.10 環境地図反映

第 15 図に環境地図反映を示す。移動障害物認識の結果を反映し、環境地図上の移動障害物の現在と前後 1 計測分の位置を走行可能として上書きし、移動障害物の情報（位置・姿勢や形状、運動状態、未来位置）と合わせて経路生成に渡す。これによって、前方を横切るような移動障害物がある場合に、移動障害物が経路をふさぐという予測からロボット車両がいったん停止することが可能である。

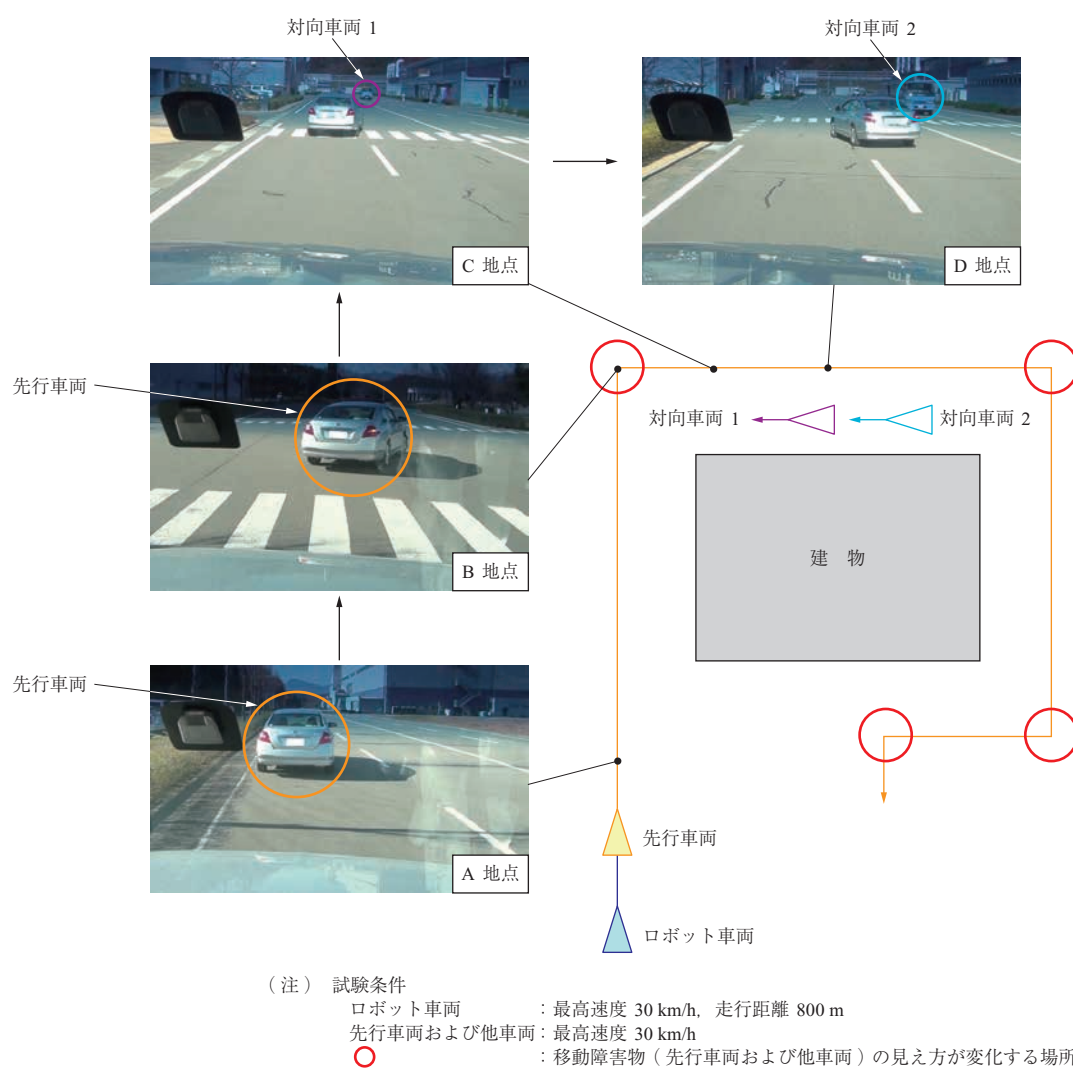
4. 移動障害物認識手法の評価

第 16 図にロボット車両搭載カメラ画像と試験条件を示す。第 2 図に示すロボット車両で第 16 図に示す試験条件で有人運転して取得したデータを使用し、提案した移動障害物認識手法をオフラインで評価した。車両の最高速度は 30 km/h と設定した。これは、たとえば広域災害・化学災害の現場などでは前線基地から被災箇所まで距離がとられる場合があり、その間をできるだけ速い速度で走行したいというニーズがあることや、物流現場における運搬車両、トラックやトレーラなどの速度制限値などを参考に設定した。車両が 30 km/h から減速して停止するまでに必要な距離は 30 m であり、ロボット車両と対向車両がともに 30 km/h で走行するときに接触しないためには、60 m 以上の遠方から対向車両を移動障害物として認識する必要がある。

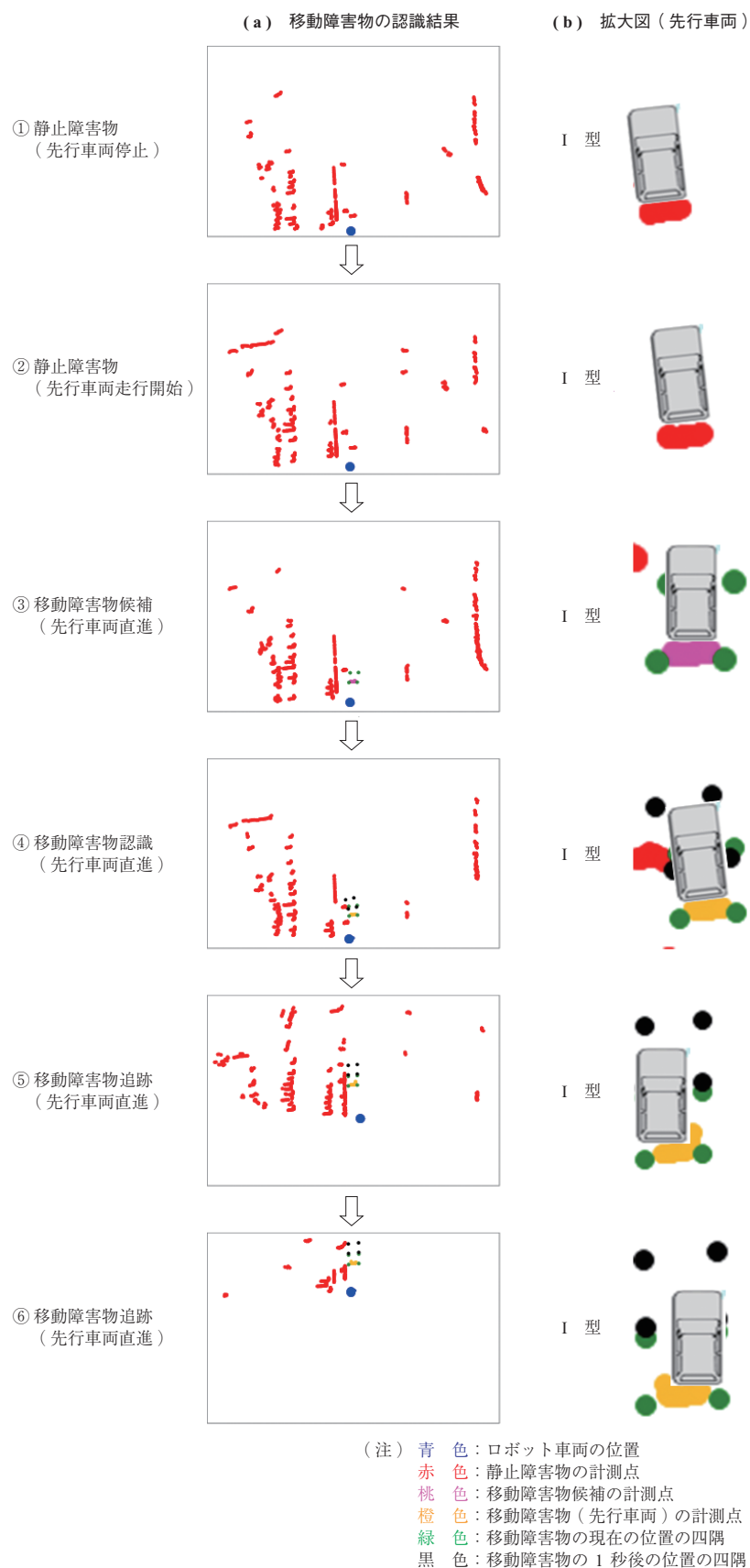
第 17 図～第 20 図に結果を示す。これらの図では、左側（- (a) ）に移動障害物の認識結果を、右側（- (b) ）にその拡大図（先行車両、対向車両）を示しており、移動障害物の現在位置の四隅を緑色の 4 点で示している。



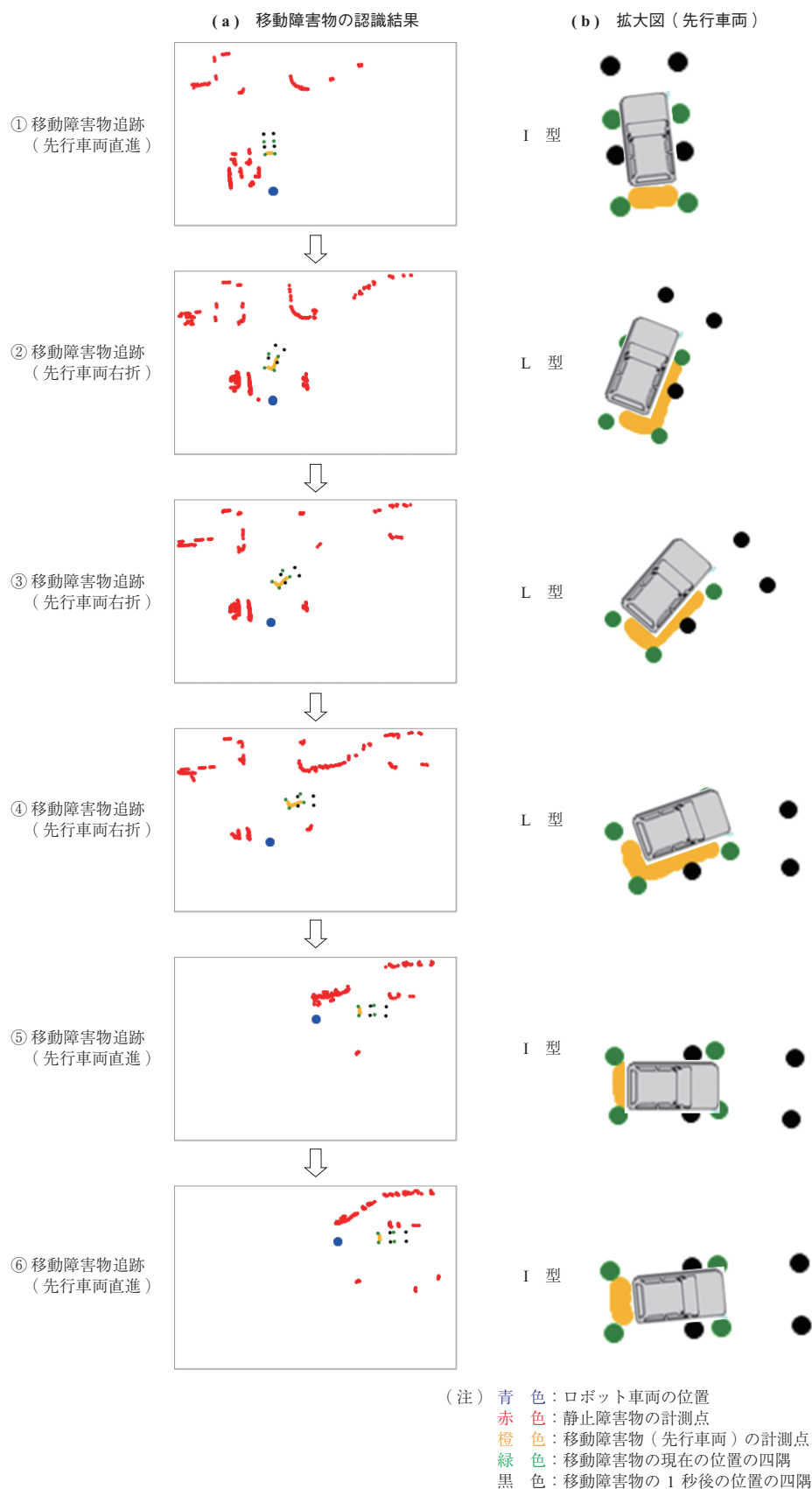
第 15 図 環境地図反映 (単位 : m)
Fig. 15 Reflection for environment map (unit : m)



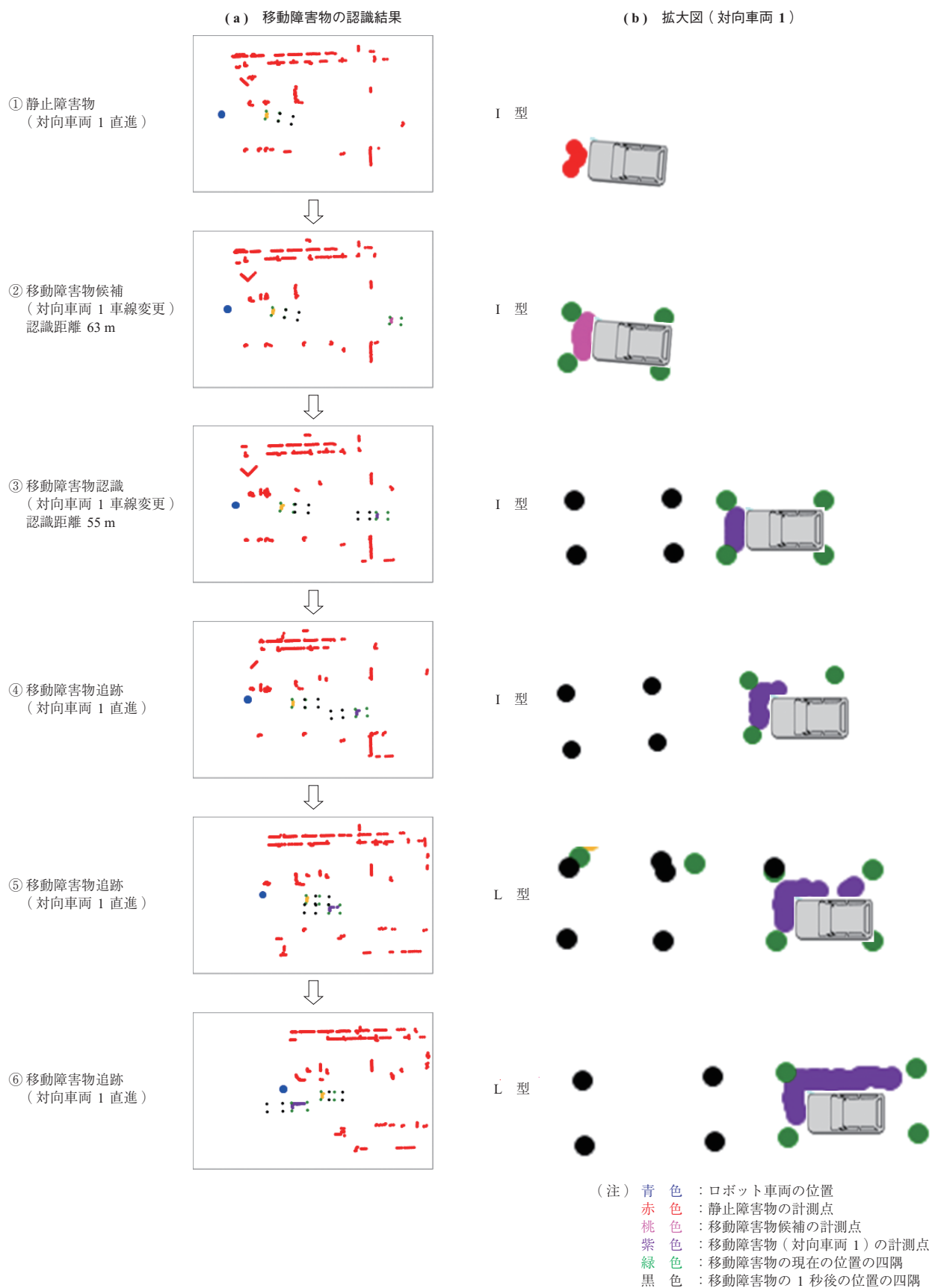
第 16 図 ロボット車両搭載カメラ画像と試験条件
Fig. 16 Test condition



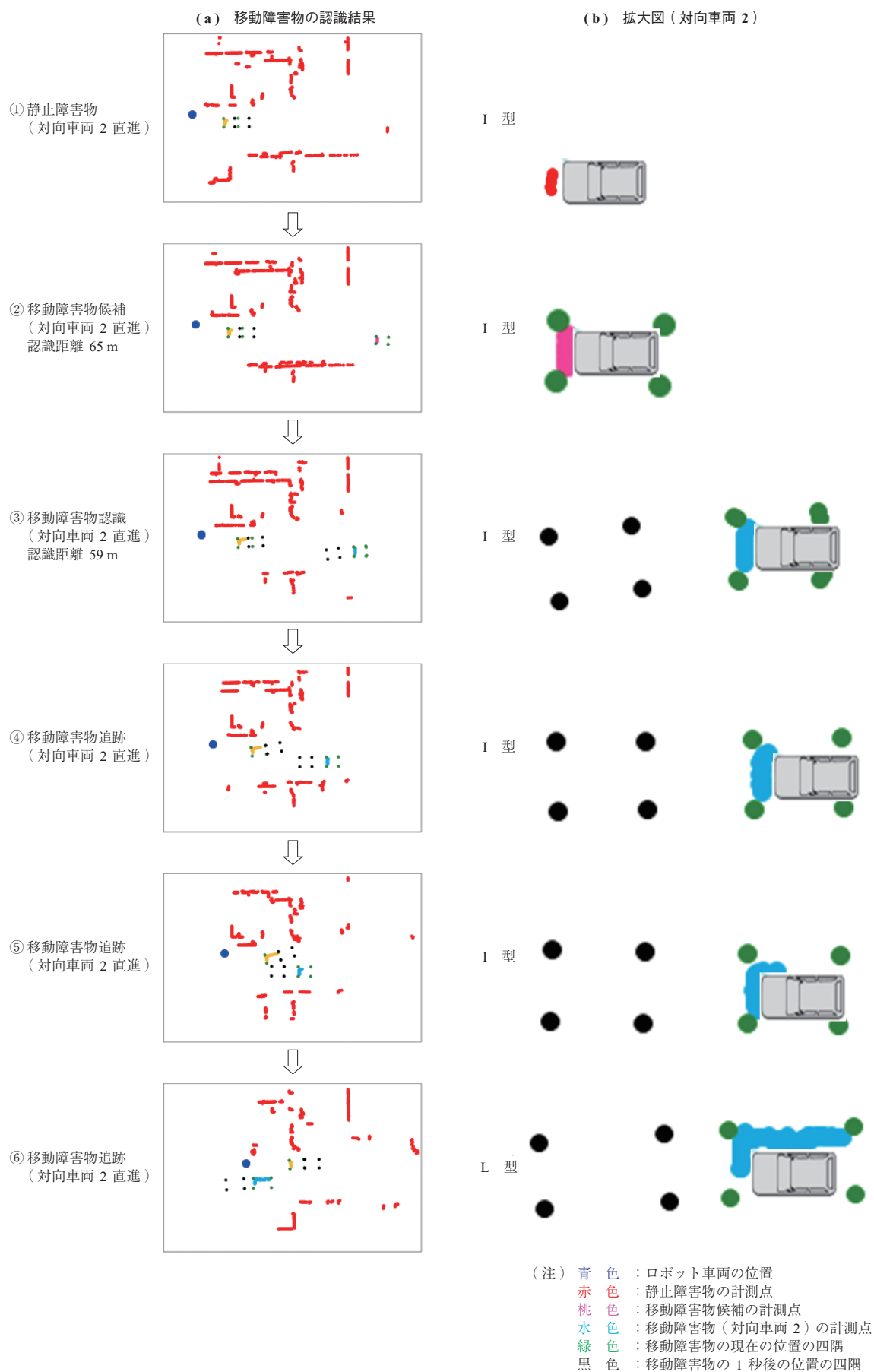
第 17 図 A 地点での先行車両の移動障害物認識結果 (直進)
Fig. 17 Result regarding preceding car (Going straight) in point A



第 18 図 B 地点での先行車両の移動障害物認識結果 (右折)
 Fig. 18 Result regarding preceding car (Right turn) in point B



第 19 図 C 地点での対向車両 1 の移動障害物認識結果
Fig. 19 Result regarding oncoming car 1 in point C



第 20 図 D 地点での対向車両 2 の移動障害物認識結果

Fig. 20 Result regarding oncoming car 2 in point D

また、未来位置の予測時間として、第 4 図および第 5 図に示すようなケースで接触の回避に最低限必要な時間を 1 秒と仮設定し、移動障害物の 1 秒後の位置の四隅を黒色の 4 点で示している。

第 17 図は、A 地点で先行車両が停止状態から走行を開始して直進するときの結果を示しており、まず移動障害物候補として認識し、その後移動障害物として認識して追跡できていることが分かる。第 18 図は、B 地点で第 17 図と同じ先行車両が右折するときの結果を示しており、相対位置の変化によって先行車両の見え方が I 型－L 型－I 型と変化しているが、見失うことなく移動障害物として追跡できていることが分かる。第 19 図および第 20 図は、それぞれ C、D 地点で 1 台目と 2 台目の対向車両とすれ違うときの結果を示しており、対向車両の 2 台についても、相対位置の変化によって見え方が I 型－L 型と変化しているが、移動障害物として認識して追跡できていることが分かる。

第 1 表に走行距離 800 m の全走行区間における試験結果を示す。全走行区間において、先行車両 1 台と対向車両 2 台を移動障害物として認識し、追跡中に見失うことはなかった。また、静止障害物を移動障害物として誤認識することもなかった。3.7.4 項に示すように、提案手法では、対向車両は移動障害物候補の段階で移動障害物と同様に扱うようにしているため、60 m 以上の遠方から対向車両を移動障害物として認識可能である。

5. 結 言

本稿では、見え方の変化に対応しながら遠方から近場まで継続的に移動障害物を認識し、その位置・姿勢や形状、運動状態の情報を推定して未来位置を予測する手法を提案した。また、オフラインで評価した結果、60 m 以上の遠方から近場まで継続的に移動障害物を認識できること、および継続的に 1 秒後の未来位置を出力できることなどの移動障害物認識の基本機能を確認した。今後、接触回避などの安全性向上を図るに当たっては認識手法だけでなく、

同認識時のロボット車両の行動制御手法も併せて開発する必要がある。行動制御は交通ルールなども含むため、災害対応や物流などの適用アプリケーションや運用環境に依存することが想定される。そこで、本結果を基にアプリケーションに合った行動制御手法の開発を進めるとともに、認識手法に関しても具体的なアプリケーションを想定した予測時間や精度の精査・定量評価などを進めていく。提案手法は、移動障害物の回避だけではなく、先行車両の認識・追跡による隊列走行などにも適用可能である。また、将来的にはロボット車両だけではなく、セキュリティ分野における不審車両や不審者の認識のようなさまざまな分野についても応用が可能と考えられ、各種応用展開についても検討を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 一般社団法人日本経済団体連合会防衛生産委員会：無人機システム (Unmanned System) の現状と動向 防衛技術調査報告書 2014 年 3 月 pp. 2_1 - 2_108
- (2) 曾根原光治, 生川俊則：技術総説 ロボット車両と技術 防衛技術ジャーナル 第 35 巻 第 6 号 2015 年 6 月 pp. 16 - 24
- (3) 曾根原光治, 生川俊則：ロボット車両と技術 IHI 技報 第 55 巻 第 3 号 2015 年 9 月 pp. 66 - 73
- (4) 株式会社 IHI エアロスペース：ホームページ「技術紹介 防衛用無人システム」(オンライン) 入手先 < https://www.ihl.co.jp/ia/research/research_08.html > (参照 2016-11-30)
- (5) 防衛省技術研究本部：ホームページ「ニュース 陸上無人機の性能確認試験」(オンライン) 入手先 < http://www.mod.go.jp/trdi/news/1309_2.html > (オンライン) 入手先 < http://www.mod.go.jp/trdi/news/1312_3.html > (参照 2016-11)
- (6) 防衛省技術研究本部：ホームページ「ニュース CBRN 対応遠隔操縦車両システムの性能確認試験」(オンライン) 入手先 < http://www.mod.go.jp/trdi/news/1502_1.html > (参照 2016-11)
- (7) 渡辺将旭, 前田宗彦, 洪川文哉, 金島義治, 村上弘記, 早瀬幸知：無人化施工における不整地運搬車両のための車両・走行安全性の監視とオペレータへの提示 第 16 回建設ロボットシンポジウム

第 1 表 試験結果

Table 1 Summary of results

評 価 項 目	単 位	結 果
見 失 い	回	0
静 止 障 害 物 の 誤 認 識	回	0
移動障害物候補の認識距離 *1	m	63, 65
移動障害物の認識距離 *1	m	55, 59

(注) *1: 対向車両との距離

2016 年 9 月 p. 2-2

- (8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) :
ホームページ「平成 28 年度「ロボット活用型市場
化適用技術開発プロジェクト」に係る実施体制の決
定について 別紙 3 : 開発するロボット技術一覧
提案題目 : コンテナ搬送自動化ロボットの開発」(オ
ンライン) 入手先 < <http://www.nedo.go.jp/content/100796485.pdf> > (参照 2016-11-30)
- (9) Anna Petrovskaya and Sebastian Thrun : Model

Based Vehicle Tracking in Urban Environments
ICRA2009 Conference Session II (2009) pp. 1
- 8

- (10) Michael S. Darms, Paul E. Rybski, Christopher
Baker and Chris Urmson : Obstacle Detection and
Tracking for the Urban Challenge IEEE
Transactions on Intelligent Transportation Systems
Vol. 10 No. 3 (2009. 9) pp. 475 - 485